

강인제어와 입력성형 기법을 이용한 이송 자벌레의 운동 해석

Motion Analysis of Inchworm using Robust control and Input shaping

양광용* · 황윤식** · 김영식† · 김인수***

Kwang-Yong Yang, Yun-Sik Hwang, Yeung-Shik Kim and In-Soo Kim

Key Words : Piezoelectric actuator(압전구동기), Inchworm(이송 자벌레), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드제어), Input Shaping(입력성형)

ABSTRACT

This paper presents motion control of the Inchworm composed of the piezoelectric actuators and mechanical elements. Piezoelectric actuator shows nonlinear response characteristics including hysteresis due to the ferroelectric characteristics. This paper proposes feedback control scheme to improve the ability of tracking response to complex input signal and suppress the phenomenon of hysteresis using the sliding mode control technique with the integrator. The sliding mode control system has the limit to minimize both the settle time and overshoot. For making up this limit, this paper also suggests input shaping technique suitable to the inchworm control system.

1. 서 론

최근 반도체 제작공정, 초정밀 공작기계, 우주항공 등 초정밀 위치 결정 기술이 중요성이 증가하고 제품의 소형화, 경량화, 첨단화 됨에 따라 미세한 부위의 고정밀도 작업이 요구된다. 나노기술의 중요 역할을 하고 있는 스마트 재료의 하나가 압전소자⁽¹⁾이다. 압전소자는 기계적 입력에서 전기적 출력으로, 혹은 전기적 입력에서 기계적 출력으로 변환을 일으킬 수 있으며 이와 같은 특징을 이용하여 구동기뿐만 아니라 센서로서도 활용되고 있다⁽²⁾. 그러나 압전소자 구동기는 그 자체가 가지고 있는 비선형으로 인해 반복 정밀도의 저하를 발생시킨다. 또한 압전소자는 강유전성에 기인한 히스테리시스(hysteresis) 특성을 포함하며 입력전압의 변화 없이 시간에 따라 변위가 증가하는 크리프(creep)특성을 가진다. 이런 비선형성과 잔류변위를 보완하고 구동 정밀도를 향상

시키기 위해 압전소자에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다^{(3)~(6)}.

본 논문에서는 압전 구동기를 통해 구동되는 이송 자벌레의 운동을 제어한다. 이송 자벌레의 동특성은 주파수 영역에서의 커브피팅 방법으로 모델링된다. 이송 자벌레의 운동은 적분기가 포함된 슬라이딩 모드 제어계를 통하여 모델링 오차, 외란 그리고 불확실성을 제거하고 다양한 기준 입력신호에 추종 능력이 우수하도록 제어된다. 또한 이송 자벌레의 잔류진동과 오버슈트(overshoot)를 최소화 시키는 입력성형 기법을 적용, 검토한다.

2. 이송자 벌레 시스템

2.1 거동 특성

이송 자벌레는 추진장치와 전단 잠금 장치와 후단 잠금 장치로 구성되고, 이송부의 최대 변위는 압전소자의 변형 한계로 인하여 최대 수십 마이크로미터 이하이다. 따라서 압전소자 변형만으로는 대 변위 이송범위를 갖는 이송장치를 구현할 수 없다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해 이송

† 교신저자; 정희원, 금오공과대학교 기계공학부
E-mail : yskim@kumoh.ac.kr

Tel : (054) 478-7346, Fax : (054) 478-7319

* 정희원, 금오공과대학교 대학원 기전공학과

** 금오공과대학교 대학원 기전공학과

... 정희원, 금오공과대학교 기계공학부

자벌레는 이송 가이드 및 지지 프레임을 만들어 대 변위 이송 구동을 가능하게 한다. 이송 원리는 위에서 언급된 세 가지 장치에 전압을 순차적으로 인가하는 방식이다⁽⁷⁾.

Fig. 1 은 이송 자벌레 운동 실험을 위한 제어 계 구성도이다. 이송 자벌레의 아래 끝단은 고정되었고 위 끝단에는 변위 센서를 설치하였고 변위 센서로부터 측정된 변위 신호는 아날로그 저역통과 필터를 거친 후 고속 이산신호 처리장치(dSPACE 1104)에 입력된다. 적분기가 포함된 슬라이딩 모드 제어기는 고속 이산신호 처리장치를 통해 제어기 출력을 발생시키고 파워 증폭기를 통해 이송 자벌레의 압전소자 구동기에 가해진다. 제어기 구동 샘플 주파수는 이송 자벌레 공진주파수를 고려하여 5kHz 로 정하였고 저역 필터의 차단 주파수는 2.5kHz 로 정하였다.

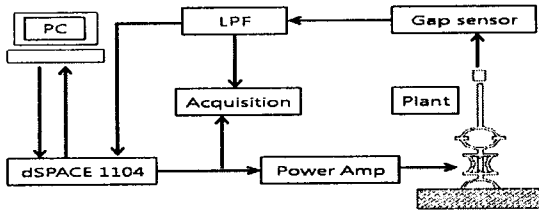


Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

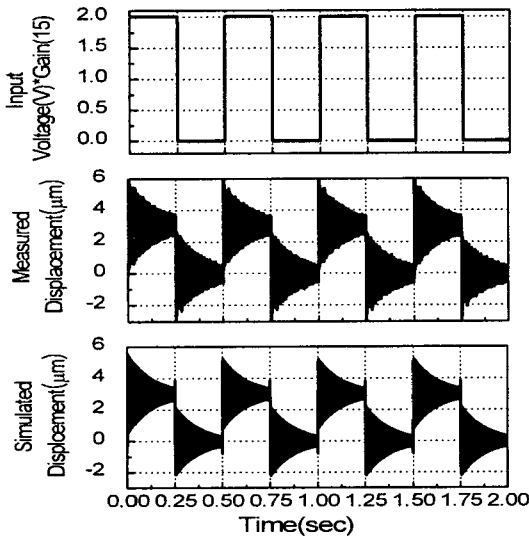


Fig.2 Measured and simulated response of the uncontrolled system of reference input

이송 자벌레는 압전소자로 인한 히스테리시스 특성과 기계적 기구로 인한 동특성을 가지고 있다. Fig. 2 는 동특성을 확인하기 위해서 30V, 0.5 초 주기의 사각파형의 기준입력과 그에 따른 응답을 측정 한 것이다. 이로부터 최대 진동 진폭은 6μm

이고 잔류진동은 0.3 초 이상 지속됨을 알 수 있다. Fig. 3 은 30V, 0.5 초 주기의 삼각파형의 입력에 대한 이송 자벌레의 응답을 보인 것으로서 히스테리시스에 의해 왜곡된 삼각파형 응답을 확인할 수 있다.

2.2 시스템 모델링

이송 자벌레의 실시간 제어를 위해서는 가능한 낮은 차수의 높은 정도를 갖는 수학적 모델이 요구된다. 본 연구에서는 실험을 통해 계의 주파수 응답을 측정하고 이를 행렬분수 표현(matrix-fraction description)을 이용하는 커브피팅 기법을 사용하여 계의 모델을 규명한다⁽⁸⁾. Fig. 4 는 실험을 통해 측정된 이송 자벌레의 주파수 응답과 모델링 된 주파수 응답을 보인 것이다.

시스템 모델 차수는 3 차로 하였고 관심 주파수 영역은 공진 주파수 655Hz 를 포함한 1kHz 범위를 갖도록 한다. 측정된 주파수 응답과 규명된 모델 사이의 오차가 미미함을 확인할 수 있다.

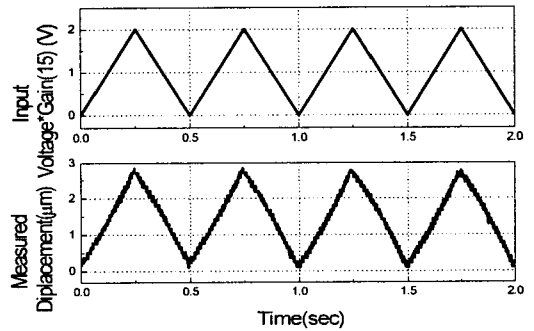


Fig. 3 Response of the uncontrolled system of triangle input

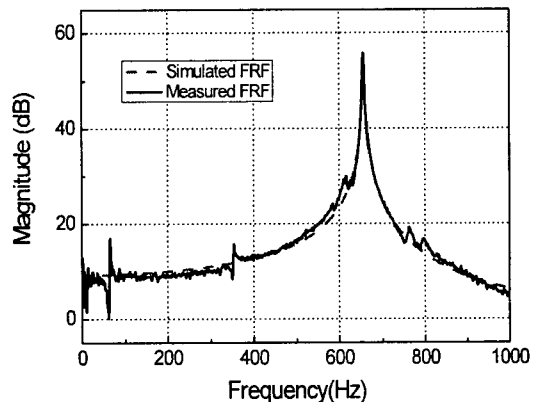


Fig. 4 Measured and simulated FRF of the system

3. 제어가 이론 및 설계

3.1 슬라이딩 모드 제어(Sliding mode control)

본 논문에서는 시스템의 불확실성, 비선형성과 외란 등에 대하여 강건한 슬라이딩 모드제어를⁽⁹⁾ 이송 자벌레의 운동제어에 적용하기 위한 제어기법을 개발하고자 한다.

슬라이딩 모드 제어기 설계는 두 가지 단계에 걸쳐서 수행된다. 첫째, 원하는 동특성을 제어기에 가하는 초평면(hyperplane)을 설계한다. 둘째, 초평면 근방에서 슬라이딩 모드가 발생하는 조건을 설계하여 상태변수들이 전환면에 구속되도록 제어한다. 적분기가 포함된 이송 자벌레의 상태변수 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

(A,B)는 시스템 행렬들이다. 전환함수(Switching Function)는 다음과 같이 가정한다.

$$s(k) = Sx(k) \quad (2)$$

여기서 $S \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 는 전계수(full rank)이며 초평면은 $S = \{x \in \mathbb{R}^n : s(k) = 0\}$ 로 정의된다⁽⁹⁾. 계의 불확실성 f 는 다음과 같이 계의 모델에 포함된다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + f(t, x, u) \quad (3)$$

여기서 $f : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$

$$f(t, x, u) = B\xi(t, x, u) \quad (4)$$

여기서 ξ 는 불확실성 또는 비선형성이다. 슬라이딩 모드제어기법에 의하여 제어입력 u 는 선형 제어부 u_l 와 비선형제어부 u_n 의 합으로 이루어지며 채터링(chattering) 문제를 해결하기 위하여 평활함수(signum function) $\text{sgn}(s(k))$ 을 사용하면 아래의 식과 같다.

$$\begin{aligned} u(k) &= u_l(k) + u_n(k) \\ u_l(k) &= -\Lambda^{-1}(SB - \Phi S)x(k) \\ u_n(k) &= -(\eta \|\Lambda\|^{-1} \|s(k)\| + \beta) \text{sgn}(s(k)) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\Lambda = SB$, η, β 는 양수인 제어계수, Φ 는 초평면의 고유치이다.

3.2 관측기 설계

제어계의 상태변수는 측정된 출력을 기초로하

여 관측된다. $\hat{x}(k)$ 는 칼만 필터(Kalman filter)에 의해서 관측된 상태변수이며 관측기 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k) \\ &+ L(y(k) - C\hat{x}(k) - Du(k)) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 A, B, C, D 는 시스템 행렬이고 y 는 측정된 출력이다. L 은 칼만 필터 이득행렬로서 오차값의 공분산이 최소화 되도록 다음과 같이 결정된다.

$$L = APC^T(R_0 + CPC^T)^{-1} \quad (7)$$

여기서 P 는 다음과 같이 표현된 리카티 방정식(Riccati equation)의 해이다.

$$\begin{aligned} P &= APA^T - APC^T(R_0 + CPC^T)^{-1}CPA^T \\ &+ LQ_0L^T \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 R_0 와 Q_0 는 측정잡음 및 관측오차와 관련된 이득행렬이다.

3.3 입력성형 기법(Input shaping)

입력성형 기법이란 계의 동적 응답 특성에 근거하여 기준 입력을 시간 지연시켜 여러 단계로 나누어 입력시킴으로써 진동을 상쇄하는 효과를 얻는 것이다. 따라서 입력 성형은 일종의 필터링 기법으로서 어떤 형태의 입력이라도 입력 성형기 필터를 거치면 잔류 진동을 제어할 수 있다.

입력성형 기법에서 주요 설계 인자는 입력신호의 크기와 지연 시간이다. 입력 신호의 크기와 시간은 시스템이 가지는 고유 진동수와 감쇠비에 따라 변화된다.

입력성형기는 서로 다른 시간간격을 가지는 다음과 같은 임펄스들의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$I_n(t) = A_0\delta(t-t_0) + A_1\delta(t-t_1) + \dots + A_n\delta(t-t_n) \quad (9)$$

식(9)에서 A_i , t_i 는 i 번째 가해지는 충격(impulse)의 크기와 지연 시간이고 t_i 는 다음과 같다.

$$t_i = \frac{i\pi}{\omega_d}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

여기서 ω_d 는 감쇠 고유진동수이다. 기준 입력에 대한 크기를 같게 하기 위해서 다음과 같은 신호크기에 대한 조건이 성립된다.

$$\sum_{i=0}^n A_i = 1 \quad (11)$$

n 개의 충격 열을 사용할 때, i 번째 충격의 크기 A_i 는 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

$$A_i = \frac{\binom{n-1}{i-1} K^{i-1}}{\sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} K^i} \quad (12)$$

$$K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (13)$$

ζ 는 감쇠비이다. 일반적으로 널리 적용되는 입력성형기의 형태는 ZV(Zero Vibration)와 ZVD(Zero Vibration and Derivative)이다. ZV 입력성형기는 Fig. 5(a)와 같이 T_1 만큼의 간격을 가지며 각각 A_1, A_2 의 크기로 임펄스를 입력하는 것이다. Fig. 5(b)는 ZVD 입력성형기이고 A_1, A_2, A_3 크기의 임펄스를 각각 $0, T_1, T_2$ 만큼의 간격을 갖는다.

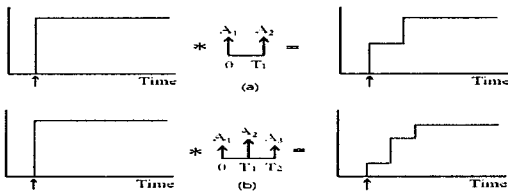


Fig. 5 (a) ZV and (b) ZVD input shaping

4. 제어 시뮬레이션 및 실험

4.1 이송 자벌레의 슬라이딩 모드 제어

Fig. 6은 적분기가 포함된 이송 자벌레의 피드백 제어계의 블록선도를 보인 것이다. 적분기는 명령 추종 성능을 향상시키기 위하여 포함된다.

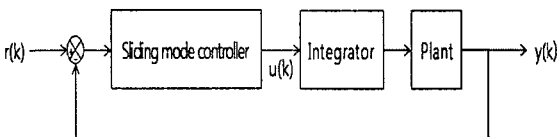


Fig. 6 Schematic diagram of the servo control system with sliding mode control

Fig. 7은 사각(square), 램프(ramp), 사인(sine)과 등이 포함된 복잡한 형태의 기준 입력신호에 대한 이송 자벌레 제어계의 측정된 응답 변위를 보인 것이다. 다양한 기준 입력에 대해서 별다른 잔류진동이 발생되지 않고 명령 추종 능력이 우수함을 알 수 있다. Fig. 8은 30V, 2Hz 삼각파 형태의 기준 입력에 대한 응답 변위를 보인 것으로서 피드백 제어계의 우수한 명령 추종기능으로 인하여 응답특성이 선형화 되어 히스테리시스 현상이 제거되었음을 알 수 있다(Fig. 3 참조).

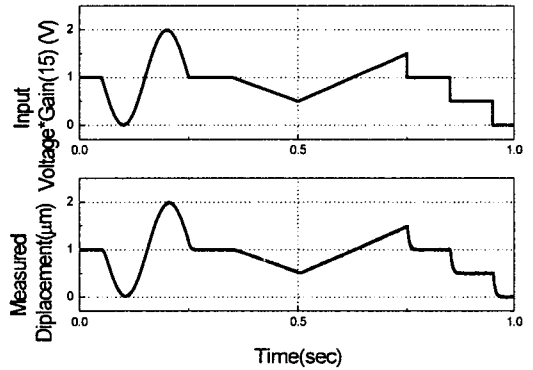


Fig. 7 Response of the controlled system of complex input with sliding mode control

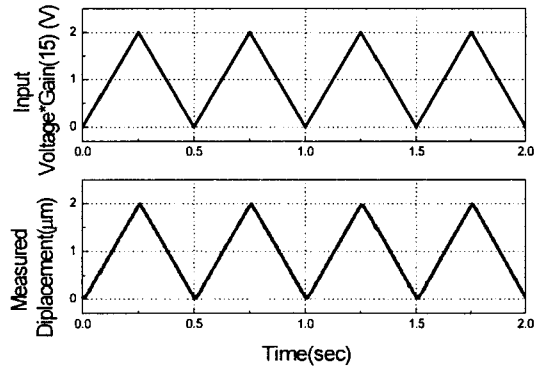


Fig. 8 Response of the controlled system of triangle input with sliding mode control

적절한 슬라이딩 제어기 설계계수 선정을 위하여 시행오차(trial-error)법을 적용하였다. 3.1절에서 언급된 제어 계수 $\eta = 0.00007$, $\beta = 0.00005$ 로 정하였고 관측기 이득 행렬 $R_0 = 1.9$ $Q_0 = 0.02$ 로 정하였다. Fig. 9는 사각파 형태의 기준 입력에 대한 응답 변위를 보인 것이다. 제어 후의 기준 입력 신호에 도달하는 상승시간(rise time)은 0.05초이며 오버슈트와 잔류진동은 발생하지 않으므로 상승시간과 정착시간이 같게 된다. 따라서

이 같은 경우에는 20Hz 이하의 사각파형 기준 입력 신호에 대해서만 이송 자벌레의 거동이 적절히 응답할 수 있다. 하지만 대 변위의 고속 이송이 필요한 경우에는 보다 빠른 속도의 이송 자벌레 구동이 요구된다.

정착시간을 보다 짧게 하기 위해서 제어 계수를 $\eta = 0.0001$, $\beta = 0.0001$ 로 변경하고 관측기 이득 행렬을 $R_0 = 0.1$ $Q_0 = 0.01$ 로 정하였다. Fig. 10 은 변경된 계수로부터 새롭게 설계된 제어기의 응답을 보인 것이다. 잔류진동을 완전히 제거하기 위해 소요된 정착시간이 0.016 초로 짧아졌지만 15.3% 오버슈트와 잔류진동이 발생됨을 볼 수 있다. 따라서 이 경우에 이송 자벌레는 60Hz 이하의 사각파형의 기준 입력 신호로 구동할 수 있지만 오버슈트 및 잔류진동으로 인하여 원활한 이송 자벌레 운동이 어려워질 수 있다. 따라서 고 주파수의 사각파와 같이 고속의 급격한 응답 변위가 요구되는 가혹한 구동조건의 기준 입력신호에 대해 적절한 이송 자벌레의 운동제어를 위해서는 슬라이딩 모드 피드백 제어기와는 별도의 추가적인 운동 제어기법이 필요할 수 있다.

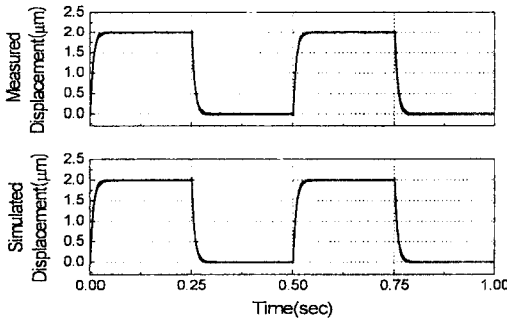


Fig. 9 Measured and simulated response of the controlled system with sliding mode control

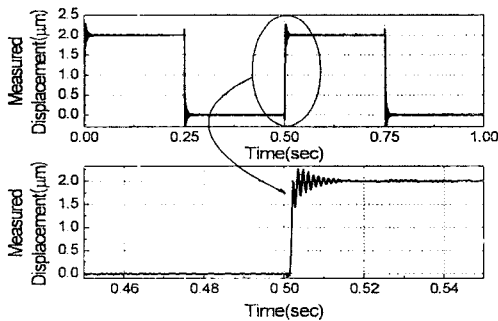


Fig. 10 Response of the controlled system with sliding mode control

4.2 슬라이딩 모드 제어기에 입력 성형 적용

슬라이딩 모드 피드백 제어만의 결과로 볼 때

고주파 사각파형의 기준 입력 신호에 대한 잔류진동을 최소화 하는 경우에는 상승시간이 느려지고, 이에 반해서 상승시간을 최소화 하는 경우에는 오버슈트와 잔류진동이 발생한다.

본 연구에서는 정착시간을 최소화 하는 동시에 오버슈트와 잔류진동을 최소화하여 이송 자벌레의 고속 정밀 제어를 가능하게 하기 위해 슬라이딩 모드 제어기에 입력 성형 기법을 병행 적용하기로 한다. Fig. 11 는 이송 자벌레 운동제어를 위해 슬라이딩 모드 제어기에 입력성형 기법을 적용한 블록선도이다. 3.3 절에 언급된 바와 같이 입력 성형 기법을 적용하기 위해서는 피드백 제어계의 고유진동수와 감쇠비를 구해야 한다. 이를 위해 슬라이딩 모드 피드백계의 주파수 응답을 실험적으로 측정하고 커브피팅하여 피드백계의 감쇠비 $\zeta = 0.05191$ 와 감쇠 고유진동수 $\omega_d = 734\text{Hz}$ 를 구하였다.

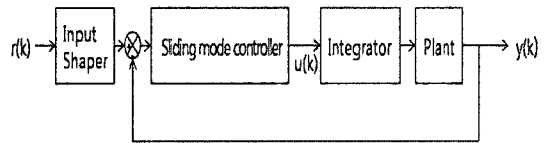


Fig. 11 Schematic diagram of the servo system with sliding mode control and input shaping

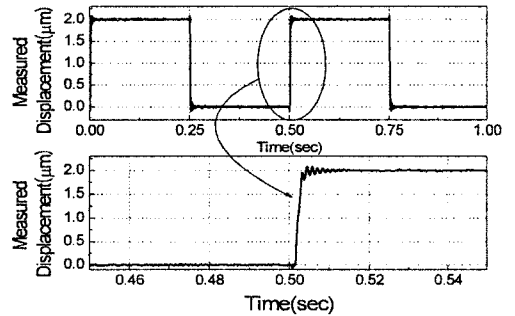


Fig. 12 Response of the controlled system with sliding mode control and ZV

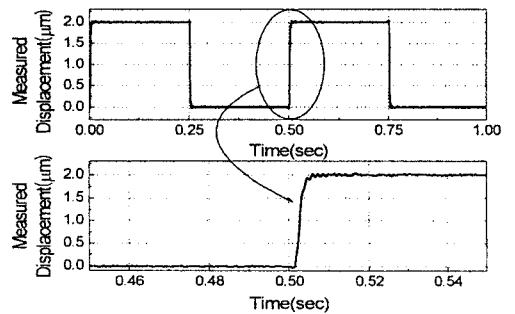


Fig. 13 Response of the controlled system with sliding mode control and ZVD

Fig. 12 는 사각파 기준입력 신호에 대해 슬라이딩 모드 피드백 제어계에 ZV 입력성형기를 적용한 응답결과를 보인 것으로서 오버슈트가 5.1% 이고 정착시간이 0.013 초임을 알 수 있다.

Fig. 13 은 슬라이딩 모드 피드백 제어계에 ZVD 입력성형기를 적용한 응답을 보인 것으로서 오버슈트는 1%이고 상승시간이 0.01 sec 이다.

이 같은 실험결과로부터 ZVD 입력성형기가 포함된 슬라이딩 모드 피드백계가 정착시간, 오버슈트 및 잔류진동 면에서 가장 우수한 제어 결과를 보임을 알 수 있다.

5. 결 론

- (1) 이송 자벌레의 운동제어를 위하여 적분기가 포함된 슬라이딩 모드 피드백 제어계를 구성하여 구동 실험을 해 본 결과 다양한 파형의 입력 신호에 대해 추종 능력이 우수하였고 히스테리시스 현상을 제거할 수 있었다.
 - (2) 고주파 사각파와 같은 가혹한 구동조건의 기준 입력 신호에 대해 적절히 반응할 수 있는 이송 자벌레 운동제어를 위해서는 제어계의 정착시간, 오버슈트 및 잔류진동을 최소화 해야 하나 슬라이딩 모드 제어계 만으로는 이송 자벌레의 정착시간과 오버슈트를 동시에 줄이는데 한계를 가질 수 있다.
 - (3) 슬라이딩 모드 제어계에 입력성형기를 병행 적용하면 정착시간과 오버슈트를 동시에 줄일 수 있어 이송 자벌레를 고속, 정밀구동하는 것이 가능하다. 또한 입력 성형기법 중에서 ZVD 입력성형기법이 잔류진동 감소 면에서 ZV 입력성형기법 보다 유리한 방법이다.
- (5) Ping Ge and Musa Jouaneh, July, 1995 "Modeling hysteresis in piezoceramic actuators ", Precision Engineering, Vol. 17 No. 3, July, 1995, pp. 211~221.
 - (6) J. Tzen , S. Jeng, W. Chieng, 2002 "Modeling of piezoelectric actuator for compensation and controller design", Precision Engineering, 5310, pp. 1~17.
 - (7) Jae Heon Yoon, Yeung-Shik Kim and In Soo Kim, 2001," Application of Piezoceramic Actuator for Inch-Worm" , Journal of the Korean Society of Precision Engineering, fall Conference,pp.877~880.
 - (8) J. N. Juang, 1994, Applied System Identification, Prentice Hall.
 - (9) C. Edward, S. K. Spurgeon, 1998, Sliding mod control, Theory and applications, Taylor and Francis Ltd, pp. 1~18.
 - (10) Singer, N. C., and Seering, W. P., 1990," Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," ASME *Journal of Dynamic System, Measurement and control*, Vol. 112, pp. 76~82

참 고 문 헌

- (1) Craig A. Robers, 1988, " Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues," Technomic Publishing Co., Inc, pp. 147~155.
- (2) Slocum, A., 1992, Precision Machine Design, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, pp.666~674.
- (3) Kaizuka, H., and Byron, S., MAY, 1988, "A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.27, No.5, pp. L773~L776
- (4) M. Goldfarb, N. Celanovic, Sep., 1997, "A Lumped Parameter Electromechanical Model for Describing the Nonlinear Behavior of Piezoelectric Actuators", Transactions of the ASME Vol. 119, pp 478~485